

# DIE ÄLTESTE MATERIE

Meteorite geben Einblick in die Anfänge  
des Sonnensystems

von Herbert Palme & Jutta Zipfel



*„Wir erhalten durch einen Meteorstein die einzig mögliche Berührung von etwas, das unserem Planeten fremd ist. Gewohnt alles Nichttellurische nur durch Messung, durch Rechnung, durch Vernunftschlüsse zu kennen, sind wir erstaunt, zu betasten, zu wiegen, zu zersetzen, was der Außenwelt angehört.“*

Alexander von Humboldt  
(Kosmos, 1844)

**V**or zwölf Jahren gab es „Nachwuchs“ bei Senckenberg: Die Sektion Meteoritenforschung wurde ins Leben gerufen. Anlass war die Übergabe der Meteoritensammlung des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz als Dauerleihgabe. Die Hauptaufgaben der Sektion sind die wissenschaftliche Betreuung der Sammlung und die Forschung im Bereich der Kosmochemie – ein Arbeitsfeld, das weit zurückweist in eine Zeit, in der unser Sonnensystem entstand.

Meteorite sind stumme Zeugen der Anfänge unseres Sonnensystems. Ihr Name stammt aus dem Griechischen und bedeutet in etwa „in der Luft befindlich“. Was wir auf der Erde finden, ist jedoch meist nur ein Bruchteil der ursprünglichen Masse des Körpers. Der größte Teil verglüht beim Eintritt in die Erdatmosphäre. Die meisten Meteorite sind Gesteine der etwa 4,56 Milliarden Jahre alten Himmelskörper (Kleinplaneten) des Asteroidengürtels zwischen Mars und Jupiter. Selten und wissenschaftlich besonders wertvoll sind Meteorite der jüngeren Oberflächen vom Planeten Mars und vom Mond.

#### Über 56500 Meteorite sind zugänglich

Die Anzahl der für wissenschaftliche Untersuchungen zugänglichen Meteorite ist seit 1986 von 2443 auf aktuell 56586 gestiegen (Meteoritical Bulletin Database). Dies ist vor allem der Erfolg einer gezielten Meteoritensuche in der Antarktis und in den Wüsten Nordafrikas. Meteorite sind aus mehreren Gründen von besonderer Bedeutung für die Wissenschaft:

- Meteorite sind meist so alt wie das Sonnensystem und somit „Zeugen“ der Entstehung fester Materie im Sonnensystem.
- Meteorite geben Aufschluss über die mittlere chemische und isotopische Zusammensetzung des Sonnensystems.
- Kleinste Einschlüsse in Meteoriten sind älter als das Sonnensystem. Sie geben uns einzigartige Einblicke in die Prozesse der Elemententstehung im Inneren von Sternen.
- Meteorite repräsentieren ein Übergangsstadium in der Entstehung der Planeten. Sie können als Bausteine der terrestrischen Planeten angesehen werden. ▶

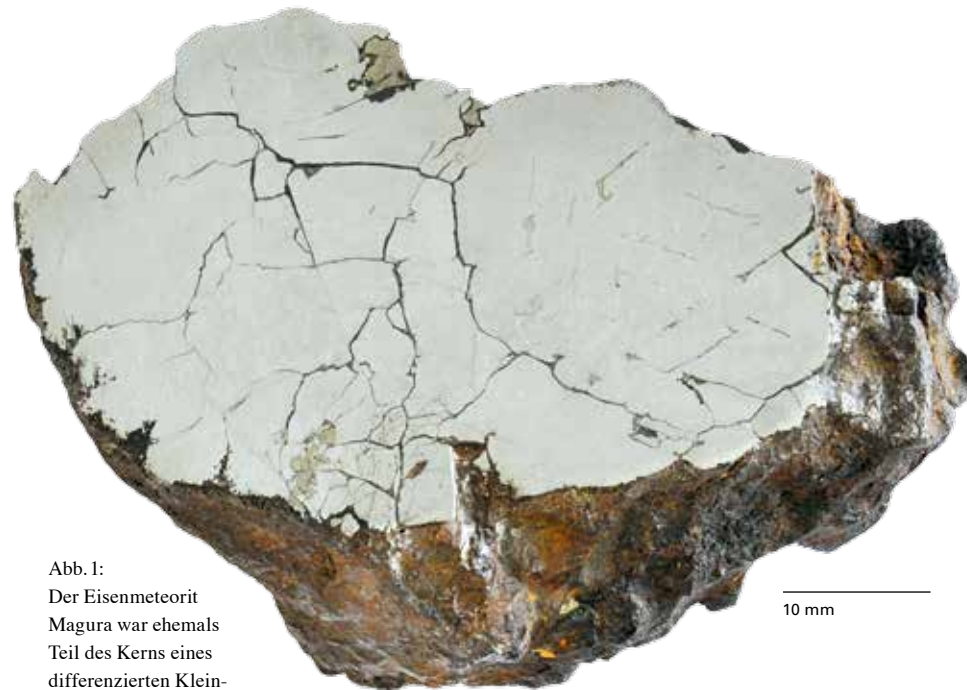


Abb. 1:  
Der Eisenmeteorit Magura war ehemals Teil des Kerns eines differenzierten Kleinplaneten. Wie der metallische Erdkern besteht er aus eisen- und nickelhaltigem Metall.

#### Differenziert oder undifferenziert?

Die *undifferenzierten* oder auch primitiven Meteorite sind Bruchstücke von Asteroiden, die in ihrem Inneren niemals Temperaturen erreicht haben, die zu globalen Aufschmelzprozessen führen, wie sie für die Kern- und Krustenbildung notwendig sind. *Undifferenzierte Meteorite* werden auch Chondrite genannt, da sie meist kleine Schmelzkügelchen, sogenannte Chondren, enthalten (Abb. 2). Wie genau Chondren entstanden sind, wissen wir noch nicht. Trotzdem geben uns chondritische Meteorite durch ihre Struktur, ihren Chemismus und ihre isotopische Zusammensetzung Aufschluss über die Art und den Zeitpunkt der Entstehung fester Materie im frühen Sonnensystem (Stracke et al. 2010).

*Differenzierte Meteorite* sind Bruchstücke von mehr oder weniger vollständig geschmolzenen und in Kern und Mantel differenzierten Kleinplaneten, aber auch von Mond und Mars (Zipfel et al. 2011). Das können Steinmeteorite sein, die zum Beispiel oberflächennah aus einem Magma auf ihrem *Mutterkörper* erstarrt sind, vergleichbar mit Basalten, wie sie auf der Erde vorkommen. Es können aber auch Eisenmeteorite sein, die vermutlich die Kerne ehemaliger Kleinplaneten bildeten und sich aus einer langsam abkühlenden Metallschmelze verfestigten (Abb. 1/3).

Abb. 2:  
Dünnschliffaufnahme einer Doppelchondre von 1,2 mm Durchmesser aus dem Meteoriten Allende. Eine große Balkenolivinchondre hat eine kleinere porphyritische Olivinchondre eingefangen.



#### Meteorite, Meteoride, Meteore

*Meteorite* sind Zentimeter bis Meter große extraterrestrische Metall- oder Gesteinsbruchstücke, die auf der Erde aufgesammelt werden. Während ihrer Reise im Weltraum werden sie als *Meteoride* bezeichnet. Sie treffen mit Geschwindigkeiten von etwa 20 Kilometer pro Sekunde auf die Atmosphäre der Erde, wo sie auf nur wenige Hundert Meter pro Sekunde abgebremst werden. Die dabei entstehende Hitze ist so stark, dass die Meteoriden den größten Teil ihrer Masse verlieren und oft völlig verdampfen. Die erzeugte Leuchterscheinung wird als *Meteor* oder *Feuerkugel* bezeichnet. Anhand beobachteter Meteoritenfälle lassen sich die Bahnparameter eines Meteoroiden bestimmen. Fast alle Bahnen haben ihren Ursprung im Asteroidengürtel, auf Sonnenumlaufbahnen zwischen Mars und Jupiter. Trotz spektakulärer Feuerkugeln sind Fallbeobachtungen selten, meist findet man ihre Bruchstücke zu einem späteren Zeitpunkt. Die Masse der aufgefundenen Meteoriten liegt zwischen wenigen Gramm und einigen Tonnen.

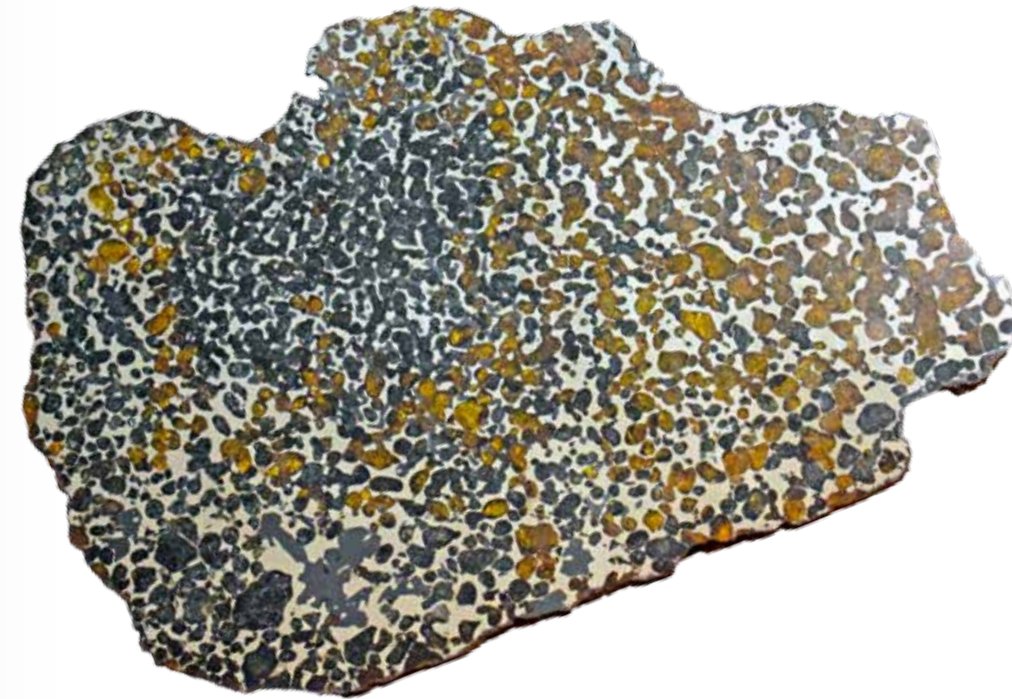


Abb. 3:  
Scheibe eines Pallasiten, der 2016 in Kenia gefunden wurde. Pallasite sind einzigartig unter den Meteoriten: der wundervolle Kontrast zwischen den großen grünlichen Olivinkristallen und dem metallischen Glanz des Eisens macht sie zu begehrten Sammlerobjekten. Pallasite sind vermutlich an der Kern-Mantel-Grenze von Kleinplaneten entstanden.

#### Älter als alle Gesteine der Erde ...

Am 8. Februar 1969 fiel im Norden von Mexiko nahe der Ortschaft Pueblito de Allende ein großer Meteorit, der bereits in der Atmosphäre in Tausende von Bruchstücken zerbrochen war. In der Folge wurden von dem Meteoriten *Allende* insgesamt etwa zwei Tonnen Material gesammelt. Besonders bemerkenswert waren helle, grobkörnige bis zu Zentimeter große Einschlüsse aus Kalzium-, Aluminiumsilikaten und -oxiden. Diese sogenannten refraktären Einschlüsse enthalten Minerale, die sich bei extrem hohen Temperaturen bildeten. Sie können auf natürliche Weise auf der Erde nicht gebildet werden, wir kennen sie nur aus Hochtemperaturkeramikwerkstoffen. Sie entstanden im sich abkühlenden solaren Nebel und repräsentieren das erste feste Material des Sonnensystems. Uran-Blei-Datierungen ergaben ein Alter von 4568 Millionen Jahren – das bedeutet, dass das Zusammenziehen einer interstellaren Staubwolke, ihr Kollaps, die Bildung der Protosonne und das Aufsammeln der zurückgelassenen Staubteilchen und ihre Akkumulation zu Kleinplaneten in nur wenigen Millionen Jahren abgelaufen sein müssen.

#### ... und zuweilen älter als das Sonnensystem

Ein sehr geringer Anteil der Materie primitiver, undifferenzierter Meteorite besteht zumeist aus mikrometergroßen (1 Mikrometer = 1/1000 Millimeter) Mineralkörnern von Siliziumkarbid und Graphit und noch viel kleineren Diamanten. Seltener sind Silikate

und Oxide. Diese Körner unterscheiden sich in der Isotopenzusammensetzung vieler Elemente von der übrigen uns zur Verfügung stehenden Materie des Sonnensystems. So haben sie  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Verhältnisse (Verhältnisse der Kohlenstoffatome mit der Masse 12 zu Kohlenstoffatome mit der Masse 13) von 10 bis über 1000, während dieses Verhältnis in allen anderen bisher untersuchten Proben des Sonnensystems 89 beträgt. Man glaubt deshalb, dass es sich bei diesen ungewöhnlichen Mineralkörnern um interstellares Material handelt, das kurz vor der Entstehung des Sonnensystems aus explodierenden Sternen anderer Sonnensysteme hervorgegangen sein muss (Leitner et al. 2016).

#### Es gibt Meteorite vom Mond ...

Während einer amerikanischen Meteoritensuche in der Antarktis 1981 wurde ein kleines, 31,4 Gramm schweres, seltsam grünlich aussehendes Gesteinsbruchstück aufgesammelt. Schnell stellte sich heraus, dass der Meteorit mit der Nummer ALHA81005 in seiner Struktur und seiner chemischen Zusammensetzung identisch war mit Proben der Apollo-Missionen vom Mondhochland. Die ersten Mondmeteorite, feldspatreiche Mondhochlandproben, könnten auch von der Rückseite des Mondes stammen (Abb. 4). Inzwischen ist die Zahl der bekannten Mondmeteorite auf über 295 angestiegen, darunter auch Basalte aus den dunklen Mondmeeren der Vorderseite des Mondes. Ein Meteoriteneinschlag auf dem Mond muss lokales Mondmaterial übrigens auf eine Mindestgeschwindigkeit von 2,38 Kilometer pro Sekunde beschleunigt haben – so hoch ist die Entweichgeschwindigkeit des Mondes. ▾



Abb. 4:  
Scheibe des Mondmeteoriten Dar al Gani 400, der 1998 in der Wüste Libyens gefunden wurde. Deutlich zu erkennen ist die brekziierte Struktur des Gesteins, wie es für die Hochlandflächen des Mondes typisch ist. Die zahlreichen hell und dunkler gefärbten Gesteinsbruchstücke sind ein Beleg für die gewaltige Kraft wiederholter Asteroideneinschläge auf der Mondoberfläche.

### ... und vom Mars ...

Dass es unter den Meteoriten auch Gesteinsbruchstücke vom Mars gibt, wurde schon lange vermutet. Die besten Kandidaten sind Meteorite der Gruppe der SNC-Meteorite (Abb. 5), die nach den Meteoritenfällen von Shergotty (Indien, 1865), Nakhla (Ägypten, 1911) und Chassigny (Frankreich, 1815) benannt sind. Heute gibt es über 190 Meteorite, die zu dieser Gruppe gehören und die man als Marsmeteorite ansieht. Ergebnisse der Mars Exploration Rover Mission haben den Marsursprung dieser Meteorite bestätigt. Von dem APX-Spektrometer (entwickelt am MPIC Mainz) wurde ein frei liegender Marsstein (Bounce Rock) untersucht, der in seiner chemischen Zusammensetzung mit den Shergotty-ähnlichen Marsmeteoriten identisch ist (Zipfel et al. 2011).

### ... und vom Asteroiden Vesta

Eine andere Gruppe von Meteoriten, die sogenannten HED-Meteorite, sind Gesteine des Asteroiden Vesta. Er hat einen Durchmesser von 550 Kilometern und ist der hellste Körper im Asteroidengürtel. Die spektrale Verteilung seines auf die Erde zurückgeworfenen Lichts ist identisch mit dem im Labor bestimmten Reflexionsspektrum von HED-Meteoriten, woraus man schließt, dass diese Meteoriten von Vesta stammen.

### Und bei Merkur und Venus?

Bisher konnten keine Meteorite als Bruchstücke von Merkur und Venus identifiziert werden. Es sollte sie aber geben.

### Bausteine der Planeten

Für die Entstehung des Sonnensystems spielt der solare Nebel, diese um die Protosonne rotierende Wolke aus Gas und Staub, eine Schlüsselrolle. Aus dieser Gas-Staub-Mischung bildete sich die feste Materie des inneren und äußeren Sonnensystems. Unterschiede in der Struktur und der chemischen Zusammensetzung der inneren Planeten sind direkt auf Vorgänge im frühen solaren Nebel zurückzuführen. Staubteilchen von weniger als einem Tausendstel Mil-

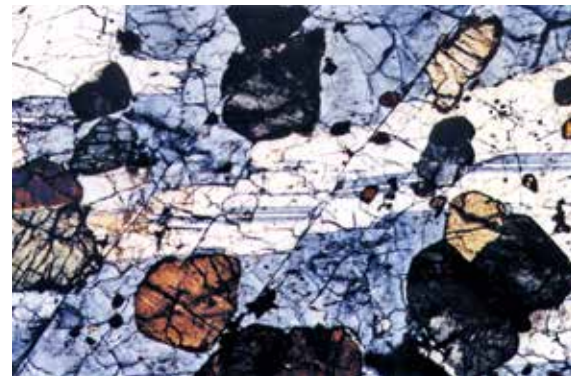


Abb. 5: Mikroskopische Aufnahme eines polierten Dünnschliffs des Meteoriten ALHA77005. Er wurde im Sommer 1977/1978 in der Antarktis nahe der Allan Hills gefunden. Die zahlreichen Risse sind auf die Zertrümmerung des Gesteins durch Einschläge auf der Marsoberfläche zurückzuführen. Größe des Bildausschnitts: 1,8 x 2,3 mm.



Die Autorin in der Meteoritensammlung.

### DIE AUTOREN



**Prof. Dr. Herbert Palme** war von 1971 bis 1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Kosmochemie am Max-Planck-Institut (MPI) für Chemie in Mainz. Von 1994 bis 2008 wurde er als Professor für Geochemie und Mineralogie an die Universität Köln berufen. Seit 2008 ist er Ehrenamtlicher Mitarbeiter bei Senckenberg. Er hat zahlreiche Artikel über die chemische Zusammensetzung terrestrischer und extraterrestrischer Materie veröffentlicht.



**Dr. Jutta Zipfel** arbeitete zwischen 1994 und 1997 als Postdoc an der University of California, San Diego, danach ging sie an die Abteilung Kosmochemie am MPI für Chemie in Mainz. Seit 2005 leitet sie am Senckenberg die Sektion Meteoritenforschung und ist für die Meteoritensammlung verantwortlich. Im Fokus ihrer Forschung stehen die Bildung primitiver Materie im Sonnensystem und die Prozesse der beginnenden Differentiation von Kleinplaneten.

**Kontakt:** Dr. Jutta Zipfel, Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Senckenberganlage 25, D-60325 Frankfurt a. M.; [jutta.zipfel@senckenberg.de](mailto:jutta.zipfel@senckenberg.de)

limeter sammelten sich in der Zentralebene der Akkretionsscheibe. Dort kollidierten sie miteinander und wuchsen nach und nach zu zentimeter- bis metergroßen Gesteinsbrocken, die sich dann durch weitere Zusammenstöße zu kilometergroßen Körpern entwickelten. Schließlich entstanden auf diese Weise Protoplaneten von der Größe unseres Mondes, sogenannte Embryos. Sie sind die Bausteine der inneren Planeten. Fast die gesamte Materie des inneren Sonnensystems war somit zunächst in Objekten von der Größe des Mondes konzentriert. Die Embryos beeinflussten sich durch ihre Schwerkraft gegenseitig in ihren Umlaufbahnen um die Sonne. Dadurch kam es zu weiteren Zusammenstößen, die schließlich zur Bildung der inneren Planeten des Sonnensystems führten.

Dieser Wachstumsprozess von Mikrometer großen Staubkörnern zu kilometergroßen Embryos bedeutet, dass alles Material, ob es nun als Planet, Asteroid oder Meteorit vorliegt aus derselben Quelle kommt.

### Viele offene Fragen

Warum sind Asteroide, aus denen Meteoriten hauptsächlich hervorgehen, nicht zu größeren Körpern zusammengewachsen? Könnte die starke Anziehungskraft des früh entstandenen Jupiters dies verhindert haben?

Asteroiden, die Mutterkörper von Meteoriten, sind so klein, dass sie rasch auskühlen und auf ihrem jeweiligen Entwicklungsstand eingefroren werden. Dies erklärt auch die hohen Alter der Meteorite. Der Anteil der Materie am Sonnensystem, der nicht in den terrestrischen (inneren) Planeten konzentriert ist, ist sehr gering. Außerdem ist der allergrößte Teil der Gesamtmasse des Asteroidengürtels in nur wenigen großen Objekten wie Ceres, Pallas und Vesta konzentriert, wobei die Gesamtmasse des größten Asteroiden Ceres nur ein Hunderttausendstel der Erdmasse beträgt. Meteoritische Materie ist extrem selten. Ein Schwerpunkt aktueller Forschung ist es herauszufinden, welche Meteoritentypen als Bausteine der inneren Planeten und damit auch der Erde angesehen werden können. ◀

### Literatur

- Meteoritical Bulletin Database. Letztes Update vom 4. Juli 2017. – <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>
- Stracke, A., Palme, H., Gellissen, M., Kleine, T., Bourdon, B., Birbaum, K., Gunther, D. & Zipfel, J. (2010): Fractionated refractory elements in the Allende meteorite. – *Geochimica Cosmochimica Acta* 74: A998–A998
- Zipfel, J., Schroder, C., Jolliff, B. L., Gellert, R., Herkenhoff, K. E., Rieder, R., Anderson, R., Bell, J. F., Bruckner, J., Crisp, J. A., Christensen, P. R., Clark, B. C., de Souza, P. A., Dreibus, G., d'Uston, C., Economou, T., Gorevan, S. P., Hahn, B. C., Klingelhofer, G., McCoy, T. J., McSween, H. Y., Ming, D. W., Morris, R. V., Rodionov, D. S., Squyres, S. W., Wanke, H., Wright, S. P., Wyatt, M. B. & Yen, A. S. (2011): Bounce Rock-A shergottite-like basalt encountered at Meridiani Planum, Mars. – *Meteorit Planet Science* 46, S. 1–20
- Leitner, J., Vollmer, C., Floss, C., Zipfel, J., & Hoppe, P. (2016): Ancient stardust in fine-grained chondrule dust rims from carbonaceous chondrites. – *Earth Planet Science Letters* 434, S. 117–128